

# VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij strojarstva – Proizvodno strojarstvo



## PODVODNO MOKRO ZAVARIVANJE REL POSTUPAK

Završni rad

Josip Katić

Karlovac, lipanj 2018

# VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij strojarstva – Proizvodno strojarstvo

## PODVODNO MOKRO ZAVARIVANJE REL POSTUPAK

### ZAVRŠNI RAD

Student: Josip Katić

Mentor: dr.sc. Tanja Tomić

Karlovac, lipanj 2018.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni preddiplomski studij: Strojstvo

Usmjerenje: Proizvodno Strojstvo

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

Student: **Josip Katić**

Matični broj: 0035193727

Naslov: **PODVODNO MOKRO ZAVARIVANJE – REL POSTUPAK**

## **IZJAVA I ZAHVALA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno uz pomoć znanja stečenih tijekom studija te stručne literature navedene u sadržaju samoga rada.

Ovim putem se zahvaljujem mentorici dr.sc. Tanji Tomić, na pomoći i strpljenju tijekom izrade završnog rada, te svojoj obitelji na podršci tijekom studija.

Josip Katić

# Sadržaj

Sadržaj .....	I
Popis slika.....	II
Popis oznaka.....	III
Sažetak.....	IV
Summary.....	V
1. Uvod .....	1
2. Općenito o zavarivanju.....	3
3. REL postupak zavarivanja .....	6
3.1. Parametri REL postupka .....	9
3.2. Oprema za REL zavarivanje .....	11
4. Podvodno zavarivanje .....	13
4.1. Podjela postupka podvodnog zavarivanja.....	13
5. Podvodno mokro zavarivanje.....	15
5.0.1. Polaritet elektrode i električni luk .....	17
5.0.2. Plinski mjehur .....	18
5.1. Oprema kod mokrog podvodnog REL zavarivanja .....	20
5.2. Osnovne tehnike rada.....	30
5.3. Obuka zavarivača/ronilaca .....	33
6. Problemi kod mokrog podvodnog zavarivanja .....	35
7. Zaključak .....	38
8. Literatura .....	39

## Popis slika

Slika 1. Suho podvodno zavarivanje [3] .....	2
Slika 2. Mokra podvodno zavarivanje [4].....	3
Slika 3. Podjela postupaka zavarivanja [6] .....	4
Slika 4. Zavarivanje taljenjem [6] .....	5
Slika 5. Shematski prikaz REL zavarivanja [8] .....	7
Slika 6. REL zavarivanje [9] .....	9
Slika 7. Moguće „njihanje“ elektrode [8] .....	10
Slika 8. Izvor struje zavarivanja [10] .....	12
Slika 9. Vodič, stezaljka za masu, držač elektrode, zaštitna sredstva i pomoćni alati [11].....	12
Slika 10. Razlika suhog i mokrog REL postupka zavarivanja [13].....	14
Slika 11. Zavarivač tijekom podvodnog mokrog zavarivanja [4].....	16
Slika 12. Utjecaj omjera topline polariteta – negativan polaritet.....	18
Slika 13. Proces mokrog podvodnog zavarivanja .....	19
Slika 14. Rast i odvajanje plinskog mjehura pri mokrom podvodnom zavarivanju [21].....	19
Slika 15. Podaci REL uređaja/izvora struje [15].....	21
Slika 16. Fleksibilan zavarivački kabel proizveden po BS 638/4 normi [16] ....	21
Slika 17. Pad napona na kabelima duljima od 50 m [13] .....	23
Slika 18. Sigurnosni prekidač [17].....	23
Slika 19. Držač elektrode za podvodno zavarivanje [18] .....	24
Slika 20. Navy 1 i Navy 2 elektrode [20].....	27
Slika 21. Elektrode Navy 1 i Navy 2 nakon završetka zavarivanja [20] .....	28
Slika 22. Zavarivači u ronilačkim odijelima s opremom .....	29
Slika 23. Tehnika povlačenja [13].....	30
Slika 24. Kut nagiba elektrode kod kutnog zvara [13].....	31
Slika 25. Tehnika njihanja [13] .....	32
Slika 26. Tehnika korak-unatrag [13] .....	32
Slika 27. Obuka podvodnog zavarivača [14] .....	33
Slika 28. Obuka zavarivača u kontroliranim uvjetima bazena [24].....	34
Slika 29. Usporedba brzina hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima i mokrom podvodnom zavarivanju [21] .....	35
Slika 30. Hladne pukotine uzrokovane vodikom kod mokrog podvodnog zavarivanja [25] .....	37

## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
$Q$	kJ/mm	Unesena toplota
$U$	V	Napon
$I$	A	Jačina struje
$S$	mm/min	Brzina zavarivanja
$\eta$	-	Stupanj iskorištenja
$K$	-	Konstanta
$M$	m	Duljina
$CSA$	mm <sup>2</sup>	Poprečni presjek

## Popis kratica

REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
MIG	Zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina
MAG	Zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina
ZUT	Zona utjecaja topline
SMAW	Shielded metal arc welding

## **Sažetak**

U ovom radu opisana je važnost podvodnog zavarivanja kao i razvoj istog kroz godine zbog zahtjeva industrije. Navedene su karakteristike i parametri klasičnog postupka REL zavarivanja u suhoj atmosferi, te oprema. Usporedno s time navedene su razlike između klasičnog REL postupka i onog u vodenj atmosferi. Prikazana je podjela podvodnog REL zavarivanja, te detaljno opisan postupak, oprema te dodatni materijal specifičan za mokri postupak podvodnog REL zavarivanja. Uz to navedene su tehnike rada i potrebna obuka zavarivača/ronioca kako bi se postupak uspješno izveo. Zaključno, navedeni su osnovni, najbitniji problemi kod ovog postupka.

Ključne riječi: podvodno mokro zavarivanje, REL postupak, tehnike rada, obuka zavarivača



## **Summary**

This thesis describes the importance of underwater welding as well as development of the same for years due to industry requirements. The characteristics and parameters of the classic SMAW welding procedure in the dry atmosphere and the equipment are listed. At the same time, there are differences between the classical SMAW procedure and the one in the aqueous atmosphere. The underwater SMAW welding is described and detailed description of the procedure, equipment and additive specific for the wet underwater SMAW welding process. In addition to this, the techniques of work and the training of the welders / divers have been described in order for the process to be successfully carried out. In conclusion, the basic, most important problems in this procedure are listed.

Key words: underwater wet welding, SMAW welding process, working techniques, welding training

## 1. Uvod

Važnost pomorskih objekata u gospodarstvu jedne regije danas ima nemjerljiv značaj. Bilo da se radi o transportu morskim putem ili eksploataciji podmorja, vrijeme je ogromnih ulaganja u postojeću infrastrukturu, kao i realizaciju novih projekata. Pomorski transport i intenzivna eksploatacija podmorja podrazumijevaju korištenje objekata, plovila i postrojenja kod kojih je dio konstrukcije ispod vodene linije. Izgradnja i održavanje takvih objekata zahtijeva primjenu posebno razvijenih tehnika, koje osiguravaju dugovječnost i ekonomičnost pri uporabi. Nažalost, iz prakse je poznato da havarije plovila ili postrojenja mogu u potpunosti ili djelomično uništiti floru i faunu prirodnog staništa te smanjiti kvalitetu života na određenom području. Trendovi u svjetskom gospodarstvu ukazuju na porast opsega pomorskog transporta dok stanje u proizvodnji i potrošnji energenata upućuje na sve već i opseg istraživanja i eksploatacije podmorja. U svijetu se ulažu ogromna sredstva kako bi se osigurale dovoljne količine energenata, a vrlo velik broj nalazišta nalazi se ispod površine mora i oceana. Tijekom godina, posebice zadnjih nekoliko desetljeća, primjetan je dinamičan razvoj na području održavanja i ispitivanja podmorskih konstrukcija. Nezamjenjivu ulogu u održavanju podvodnih konstrukcija imaju nerazorna ispitivanja i postupak mokrog podvodnog zavarivanja kojim se vrlo brzo i efikasno mogu izvesti sanacije lomova konstrukcijskih elemenata na licu mjesta, a u slučaju dobre pripreme i organizacije moguća je izvedba montažnih zavara. [1]

Troškovi rada i održavanja off-shore konstrukcija su visoki te se stoga konstantno istražuju nove tehnologije i postupci kojima će se povećati produktivnost, a pritom smanjiti cijena reparature i održavanja. Tijekom godina, a posebice zadnjih nekoliko desetljeća, primjetan je dinamičan razvoj na području održavanja i ispitivanja podmorskih konstrukcija. Površina svjetskog mora pokriva oko 71% površine Zemlje, te se na toj površini danas odvija gotovo 4/5 svjetskog robnog prometa. Sve platforme, brodovi, cjevovodi te ostale off-shore konstrukcije podložne su nastajanju raznih oštećenja uslijed korozije, zamora materijala, teških vremenskih prilika i sudara s drugim plovilima. Nažalost, često su posljedice razne ekološke katastrofe i gubici ljudskih života uslijed lošeg rukovanja postrojenjima i neprimjerenog održavanja. Pomorski objekti danas su rasprostranjeni na širokom rasponu dubina, od nekoliko 10-aka metara sve do dubina od 1000 m i dublje. Kod velikih dubina i visokih zahtjeva kvalitete zavarenih spojeva koriste se tehnike suhog podvodnog zavarivanja (slika 1), a za dubine do približno 70 m i nižih zahtjeva kvalitete zavarenih spojeva, tehnike mokrog podvodnog

zavarivanja (slika 2). Dobro uvježban i educiran tim ljudskih resursa, uključujući ronioce i organizacijski tim na površini, odlučujući su u ostvarivanju visoke sigurnosti na radu, te su nosioci velike odgovornosti u obavljanju ovakvih poslova. Mokro podvodno zavarivanje, zajedno s ispitivanjem zadobili su povjerenje te su profesionalno prihvaćeni. Za postizanje visoke kvalitete zavarenih spojeva dobivenih ovom tehnikom zaslužan je razvoj novih tehnologija zavarivanja, izvora struje, ronilačke opreme, dodatnih materijala kao i bitnih poboljšanja u osposobljavanju zavarivača. Tehnika mokrog podvodnog zavarivanja danas je jedna od glavnih tehnika za reparaturne i remontne radove na podvodnim konstrukcijama. [2]



**Slika 1. Suho podvodno zavarivanje [3]**



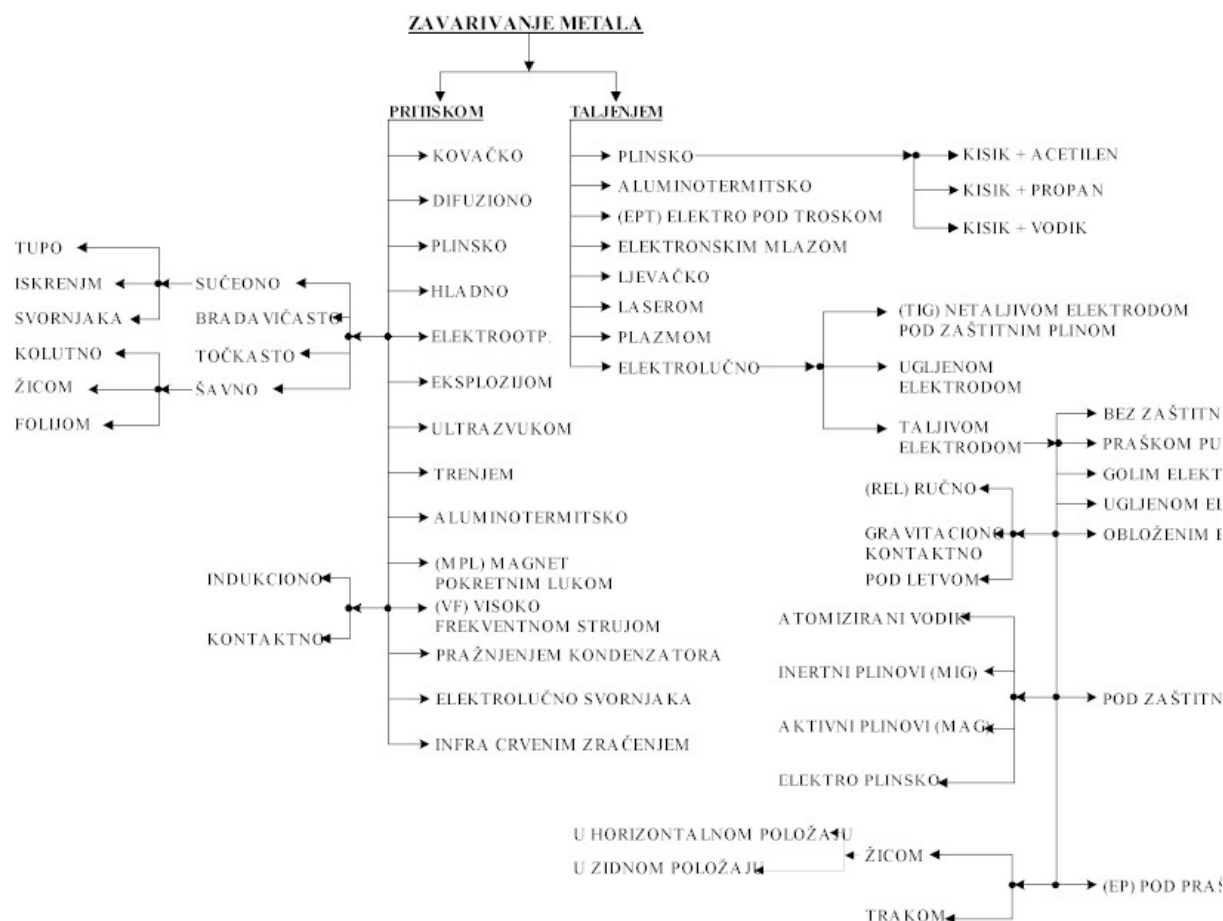
**Slika 2. Mokro podvodno zavarivanje [4]**

## **2. Općenito o zavarivanju**

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istovrsnih ili raznovrsnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogen zavareni spoj.

Prema načinu spajanja metode zavarivanja se dijele u dvije velike grupe [5]:

- **Zavarivanje taljenjem**, zavarivanje materijala u rastaljenom stanju na mjestu spoja, uz dodatni materijal ili bez njega.
  - Plinsko zavarivanje
  - Elektrolučno zavarivanje
- **Zavarivanje pritiskom** zavarivanje materijala u čvrstom ili omekšanom stanju na mjestu spoja s pomoću pritiska ili udarca.
  - Kovačko zavarivanje
  - Elektrootporno zavarivanje



**Slika 3. Podjela postupaka zavarivanja [6]**

Za zavarivanje osnovno je unijeti u sami spoj energiju potrebnu za taljenje osnovnog materijala, a energija može biti u obliku mlaza vrućih plinova (plinski plamen - Autogeno zavarivanje), električni luk (REL, MIG/MAG, TIG), električna struja (elektrootporno zavarivanje), trenje, ultrazvuk, tokovi zračenja (laser), itd.

Tijekom unosa energije i dodatnog materijala u sami spoj formira se zona osnovnog materijala koja se tali te homogenizira u talini s dodatnim materijalom, a sve u pravilu, u nekoj vrsti zaštitne atmosfere s ciljem smanjenja atmosferskog utjecaja na zavareni spoj.

Zona do rastaljenog spoja je Zona utjecaja topline (ZUT) koja je dio osnovnog materijala, a pod utjecajem topline unesene zavarivanjem promijenila je kristalnu strukturu, a time i mehanička svojstva. Što je čelik zakaljiviji to je veća njegova osjetljivost na ZUT jer će se dio energije taljenja unesti i osnovni materijal do zavara te dovesti do mogućeg nepoželjnog kaljenja, tj. krhkosti.

Osnovni je način smanjenja ZUT-a smanjenje unesene energije u vidu generirane topline potrebnu za stvaranje zavarenog pa stoga kvantitativno možemo podijeliti postupke zavarivanja prema količini unesene topline.

$$Q = \left( \frac{U \times I \times 60}{S \times 1000} \right) \times \eta \quad [1]$$

Gdje je:

$Q$  - unesena toplota [kJ/mm]

$U$  - napon [V]

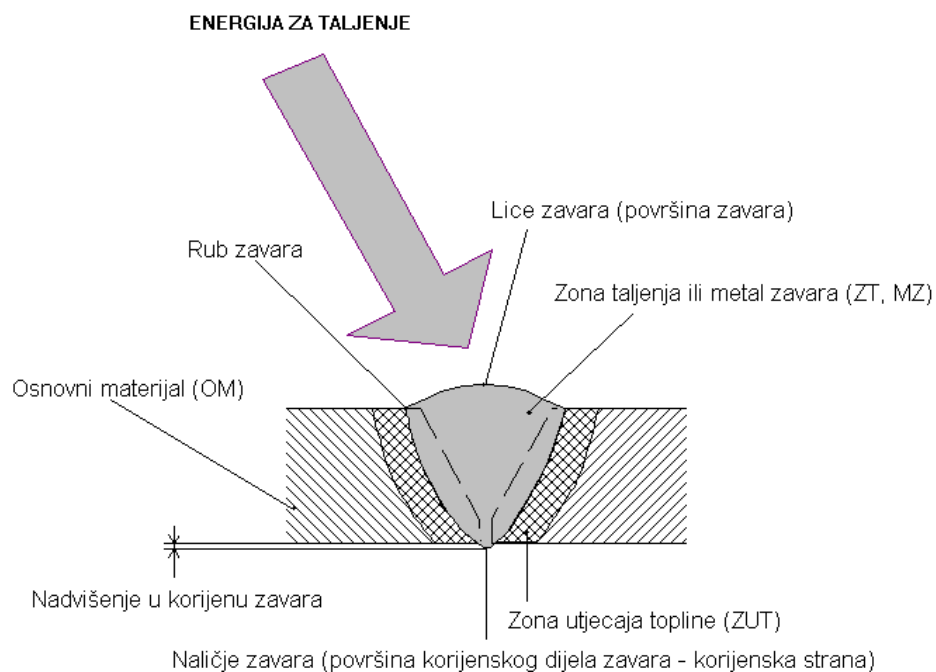
$I$  - jačina struje [A]

$S$  - brzina zavarivanja [mm/min]

$\eta$  - stupanj iskorištenja [-]

Stupanj iskorištenja ( $\eta$ ) konstantan je za svaki postupak, pa tako za REL postupak iznosi 0,75, za TIG 0,8, a za MIG 0,9.

Općenito prema unosu topline najviše je unosi autogeno zavarivanje (plinsko, kisik - acetilen), a najmanje zavarivanje laserom, dok bi se REL postupak nalazio se u sredini. [7]



**Slika 4. Zavarivanje taljenjem [6]**

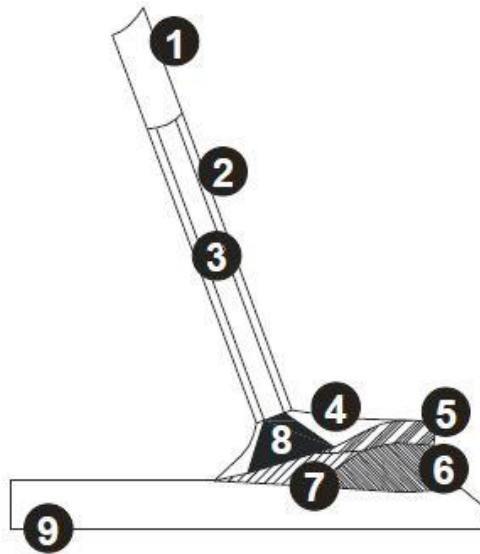
### 3. REL postupak zavarivanja

Ručno elektrolučno zavarivanje (kratica REL, eng. SMAW – *Shielded metal arc welding*) je najstariji elektrolučni postupak zavarivanja koji ima važno mjesto u proizvodnji zavarenih konstrukcija i pokazuje se kao tehnologično rješenje ako je riječ o izvođenju kraćih zavora, pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji, reparaturnom zavarivanju, zavarivanju u otežanim uvjetima rada i slično.

Kod REL postupka zavarivanja električni luk se uspostavlja kratkim spojem između elektrode koja je ujedno i dodatni materijal, i radnog komada. Taljenjem jezgre i obloge elektrode stvara se odgovarajuća količina rastaljenog materijala, troske i plinova. Tekuća troska prekriva metalnu kap za vrijeme prolaza kapi kroz električni luk, a dodatnu zaštitu metalne kapi tvore plinovi koji nastaju disocijacijom komponenata obloge. Obloga se tali od unutarnje strane prema vanjskoj, tako da se na vrhu elektrode stvara krater koji usmjerava struju plinova i kapi rastaljenog metala i troske prema rastaljenom osnovnom materijalu. Hlađenjem se tekući metal skrućuje, a sloj troske koji ga prekriva regulira njegovu brzinu ohlađivanja, a samim tim utječe na tijek i uvjete kristalizacije. Ravnomjernim "dodavanjem" elektrode u električni luk od strane zavarivača te njenim poprečnim gibanjem (bilo pravolinijskim kretanjem ili drugim propisanim kretanjem) na mjestu zavarivanja, nastaje zavareni spoj.

Poprečno gibanje elektrode (okomito na smjer gibanja) utječe na oblik zavarenog spoja (širinu) i na količinu unesene topline u radni komad (osnovni materijal).

Uspostavljanje električnog luka provodi se kresanjem (povlačenjem elektrode) ili dodirom (kratkim spojem) uz odmak elektrode nakon uspostavljanja električnog luka. Prekid električnog luka izvodi se podizanjem elektrode iznad kraja zavarenog spoja ili prelaskom luka na skrutnutu trosku. [8]



**Slika 5. Shematski prikaz REL zavarivanja  
[8]**

Shematski prikaz REL zavarivanja:

- 1 - obložena elektroda
- 2 - obloga
- 3 – žica
- 4 – zaštitni plinovi
- 5 – troska
- 6 – metal zavora
- 7 – rastaljeni materijal
- 8 – električni luk
- 9 – osnovni materijal

Kako svaki postupak ima svoje prednosti i nedostatke, tako i REL postupak karakteriziraju određene prednosti i problemi koji idu uz provedbu istog.



Prednosti REL postupka:

- širok spektar dodatnih materijala
- mala cijena opreme za zavarivanje u odnosu na druge postupke
- pogodan za manja zavarivanja
- zavarivanje u svim položajima
- pogodan za terenski rad
- jednostavno rukovanje opremom
- dobra mehanička svojstva zavarenih spojeva

Nedostatci REL postupka:

- mala brzina zavarivanja i niska produktivnost u odnosu na ostale postupke (MIG/MAG i EP)
- kvaliteta zavarenog spoja ovisi o vještini zavarivača koji zavaruje
- relativno dugo vrijeme izobrazbe zavarivača
- neizbježan otpad elektrode
- gubitak materijala zbog prskanja
- gubitak vremena zbog čišćenja troske
- štetni plinovi i bljeskanje tijekom zavarivanja
- dugotrajan rad ostavlja posljedice na zdravlje zavarivača



**Slika 6. REL zavarivanje [9]**

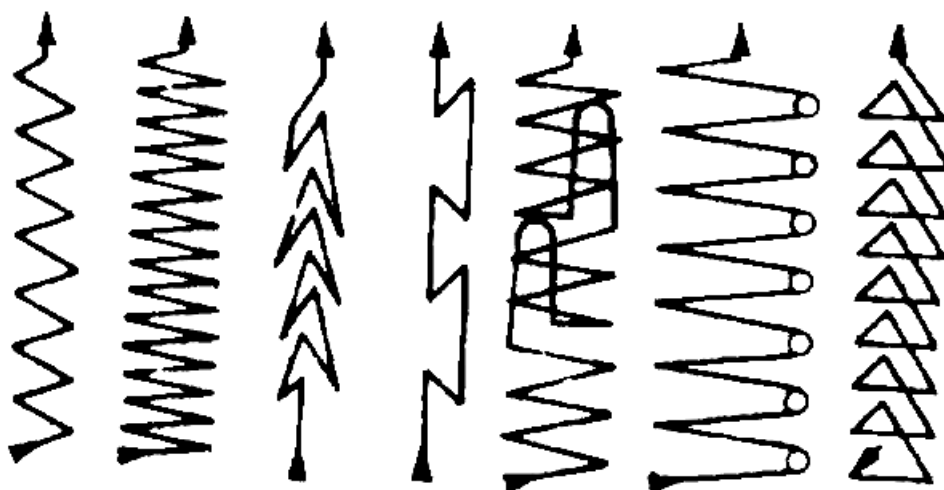
### **3.1. Parametri REL postupka**

Parametri i faktori utjecaja kod REL postupka zavarivanja su:

- a) Jakost struje zavarivanja - ovisi o promjeru i tipu elektrode, vrsti spoja, debljini osnovnog materijala te o položaju zavarivanja. Povećanjem dimenzija elektrode raste i jakost struje zavarivanja (jer nam je potrebna veća količina topline da bi talili elektrodu većih dimenzija). Kod REL postupka najčešće vrijednosti struje iznose od 30 do 40 A  $\times d$  – promjer [mm], odnosno 10% - 20% manje vrijednosti struje ako se radi o prisilnim položajima zavarivanja.
- b) Polaritet i vrsta struje – odabiru se prema preporuci proizvođača elektroda. Pogrešno odabrani polaritet i vrsta struje mogu uzrokovati greške u zavarenom spoju (npr. poroznost), povećano prskanje i lošu stabilnost električnog luka. Za elektrode s

bazičnom oblogom preporučuju se koristiti istosmjerni izvori struje (elektroda na + polu), dok za ostale elektrode možemo koristiti i izmjenične izvore.

- c) Nagib elektrode i dužina električnog luka – manjim nagibom elektrode postizemo kraći električni luk koji ima veću snagu i penetraciju, dok se većim nagibom elektrode dobiva dulji električni luk koji nam nije poželjan jer nam se smanjuje zagrijavanje i taljenje osnovnog materijala, povećava se štrcanje materijala koje povećava gubitak materijala, te se smanjuje zaštita taline. Kod zavarivanja u prisilnim položajima odgovarajućim nagibom elektrode zadržava se talina i tako se utječe na oblik zavarenog spoja.
- d) Brzina zavarivanja - ovisi o jakosti struje, vrsti elektrode, vrsti osnovnog i dodatnog materijala, vrsti i dimenzijama spoja i tehnici rada. Brzina se odabire i prema dopuštenoj količini unosa topline u osnovni materijal. Veće brzine zavarivanja su pogodnije za visokolegirane čelike kako bi unijeli što manje topline. Bazičnim elektrodama postizemo manje brzine zavarivanja nego rutilnim i kiselo obloženim.
- e) Poprečna kretanja elektrode (njihanje) - utječu na oblik zavarenog spoja i na unos topline u osnovni materijal. Odabir načina kretanja elektrode ovisi o radnim uvjetima i zahtjevima zavarenog spoja.



Slika 7. Moguće „njihanje“ elektrode [8]

- f) Uspostava i prekid električnog luka – povećava pojavu prskanja i poroznosti pa usporavaju zavarivanje zbog čišćenja troske.
- g) Položaj zavarivanja – utječe na odabir parametara zavarivanja. Ukoliko je položaj nepovoljan, morati ćemo podesiti parametre koji će nam dati željeni rezultat zavarivanja. [8]

### 3.2. Oprema za REL zavarivanje

Oprema za REL zavarivanje sastoji se od [8]:

- Izvor struje za zavarivanje
- Vodič
- Stezaljka za masu
- Držać elektrode
- Zaštitna sredstva
- Pomoćni alati



**Slika 8. Izvor struje zavarivanja [10]**



**Slika 9. Vodič, stezaljka za masu, držač elektrode, zaštitna sredstva i pomoćni alati [11]**

## 4. Podvodno zavarivanje

Koncept izvođenja podvodnog zavarivanja uključuje zavarivanje izvedeno ispod površine vode na određenoj dubini, u suhom ili mokrom okruženju.

Mokro podvodno zavarivanje podrazumijeva da se postupak zavarivanja provodi izravno u vodi bez ikakve izolacijske prepreke kako bi se spriječio dodir vode s mjestom rada, zavarivanjem, električnim lukom, dodatnim materijalom i zavarivačem.

U slučaju suhog podvodnog zavarivanja nema izravnog kontakta okolne vode na električni luk i zavareni bazen jer je podijeljen mehaničkom barijerom koja osigurava suhu atmosferu, ovisno o dubini vode i oblika komada koji se zavaruje.

Tehnika mokrog podvodnog zavarivanja dugo je bila podcijenjena te sinonim za niskokvalitetan zavar, pun poroznosti i pukotina s lošim mehaničkim svojstvima kao što je niska duktilnost i zbog mikrostrukturnih problema koji su skloni pucanju. Ovaj nedostatak iskustva i znanja prisutan je u tvrtkama koje nisu razumjele sve podvodne probleme zavarivanja što je dovelo do razvoja neadekvatnih postupaka zavarivanja, slabe tehnike zavarivanja i neprikladnih dodatnih materijala. Kroz vrijeme se taj status promijenio, a danas se podvodne tehnike zavarivanja, suhe i mokre, koriste u najsloženijim i najtežim predmetima s visokom razinom osiguranja kvalitete. [12]

### 4.1. Podjela postupka podvodnog zavarivanja

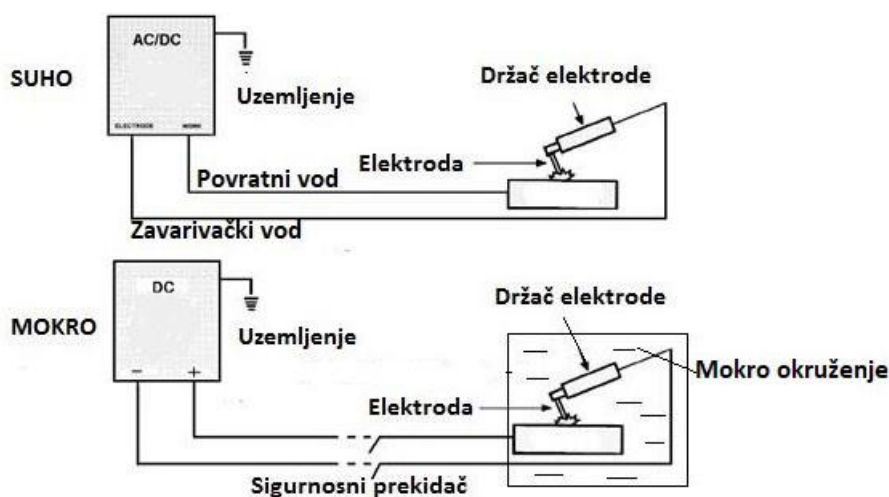
Podvodno zavarivanje možemo podijeliti u 2 skupine s podskupinama [12]:

- a) **Suho podvodno zavarivanje** – smatra se zavarivanjem u stvorenoj suhoj atmosferi pod atmosferskim ili hiperbaričkim tlakom, gdje se ronilac odvoji iz okolne vode pomoću mehaničke barijere. Potreban nam je velik broj prateće podvodne i nadvodne tehničke podrške u izgradnji komora za zavarivanje. Svaki predmet zavarivanja zahtjeva posebnu komoru za zavarivanje pa je zbog toga proces pripreme vrlo dug. Osnovna prednost je ta da su zavari vrlo kvalitetni s odličnim mehaničkim svojstvima. U suhom podvodnom zavarivanju postoji veća fleksibilnost pri odabiru načina zavarivanja ovisno o dubini, vrsti i debljini materijala pa se ne koristi isključivo REL postupak.
  - Suho podvodno zavarivanje na atmosferskom tlaku – zavarivanje u komori kojoj je postignut tlak od 1 ATM

- Suho podvodno zavarivanje u „staništu“ – zavarivanje pri okolnom tlaku u velikoj komori iz koje je odstranjena voda i gdje je postignuta takva atmosfera u kojoj zavarivač/ronilac ne treba koristiti opremu za ronjenje
- Suho podvodno zavarivanje u komori – zavarivanje pri okolnom tlaku u jednostavnoj komori bez dna koja je napravljena da zavarivač može zavarivati do visine ramena u punoj ronilačkoj opremi
- „Dry spot“ suho podvodno zavarivanje -zavarivanje pri okolnom tlaku u maloj, prozirnoj, tlakom napunjenoj pregradi/komori, dok je zavarivač/ronilac u vodi

b) **Mokro podvodno zavarivanje** - smatra se zavarivanjem pri tlaku okoline u kojem nema mehaničke prepreke između zavarivača/ronioca i okolne vode.

Princip zavarivanja podvodnim suhim i mokrim REL postupkom je sličan, iako postoji razlika u opremi koja se koristi.



**Slika 10. Razlika suhog i mokrog REL postupka zavarivanja**  
[13]

Slika 10 nam pokazuje razliku u opremi kod suhog i mokrog podvodnog zavarivanja. Podvodni REL postupak zavarivanja ima bolje izoliran aparat i provodnike zbog utjecaja vodene atmosfere, naprema konvencionalnog REL postupka. Suho zavarivanje kao izvor struje može koristiti AC ili DC, koji se odabire prema proizvođaču elektroda. Mokro zavarivanje koristi isključivo DC izvor struje te je elektroda priključena na negativan pol izvora, također imamo i sigurnosni prekidač pomoću kojega zatvaramo strujni krug te se uvijek nalazi izvan vode pri ruci vanjskog operatera. Kod mokrog zavarivanja istosmjerna struja smanjuje opasnost od strujnog udara, lakše se uspostavlja električni luk koji je također i stabilniji. [13]

## 5. Podvodno mokro zavarivanje

Prije svakog početka operacije mokrog podvodnog zavarivanja postoji niz faktora koji se moraju utvrditi [13]:

- 1) Osnovni materijal
- 2) Izgled zavora i pozicija zavarivanja
- 3) Odabir dodatnog materijala (elektrode)
- 4) Potrebna zavarivačka oprema
- 5) Okolišni uvjeti
- 6) Tehnika zavarivanja
- 7) Magnetske smetnje (uzrok i prevencija)
- 8) Specifikacija kvalitete zavora
- 9) Nadzor i zapis operacija zavarivanja
- 10) Kontrola zavora

- 1) Osnovni materijal – poznavanje sastava materijala je vrlo važan faktor za uspješno zavarivanje
- 2) Izgled zavora i pozicija zavarivanja – potrebno je odabrati odgovarajući spoj (vrstu) zavora (komplicirane vrste zavora nisu pogodne za podvodno mokro zavarivanje) i poziciju u kojoj će zavarivač/ronilac najkvalitetnije izvršiti zavarivanje
- 3) Odabir odgovarajućeg dodatnog materijala – vrsta, odgovarajuća veličina, vodonepropusni sloj i radne karakteristike odabrane elektrode



- 4) Potrebna zavarivačka oprema – odgovarajuća zaštita zavarivača, izolirana oprema za zavarivanje, obavezan sigurnosni prekidač na prigodnom mjestu, odgovarajući izvor DC struje koji je pravilno uzemljen, te ostali pomoćni alati
- 5) Okolišni uvjeti - dubina na kojoj zavarujemo, vidljivost u vodi, morske struje, plima i tip vode su faktori koje moramo uzeti u obzir. Zavarivanje na većoj dubini utječe na zavarivanje zbog većeg tlaka na velikoj dubini, koji utječe na električni luk, te i duljina kabela koja smanjuje napon.
- 6) Tehnika zavarivanja – ovisno o poziciji i vrsti spoja koji zavarujemo odabiremo odgovarajuću tehniku zavarivanja (povlačenje, korak unatrag, njihanje)
- 7) Magnetske smetnje – 3 su osnovna tipa magnetskih smetnji/udara koje moramo predvidjeti ili korigirati tijekom rada: a) prednji udar, b) stražnji udar, c) bočni udar. Oni se pojavljuju prije ili kasnije, pa ih moramo znati prepoznati.
- 8) Specifikacija kvalitete zavora – za svaki posao zahtjeva se određena kvaliteta zavora zbog sigurnosti konstrukcije. Zbog toga i zavarivači moraju biti kvalificirani za određenu razinu posla koji obavljaju.
- 9) Nadzor i zapis operacija zavarivanja – pod vodom je zavarivaču teže kontrolirati svoje rezultate zavarivanja te mu je zbog toga potreban nadzor i savjetovanje od svog pomoćnog tima radi održanja kvalitete i zadanih specifikacija zavora
- 10) Kontrola zavora – da bi mogli ispuniti specifikacije kvalitete od naručitelja zavarivanja mora se dati što više informacija kako se izvršilo zavarivanje, pod kojim parametrima, kojom opremom, pri kojim uvjetima rada, itd.



**Slika 11. Zavarivač tijekom podvodnog mokrog zavarivanja [4]**

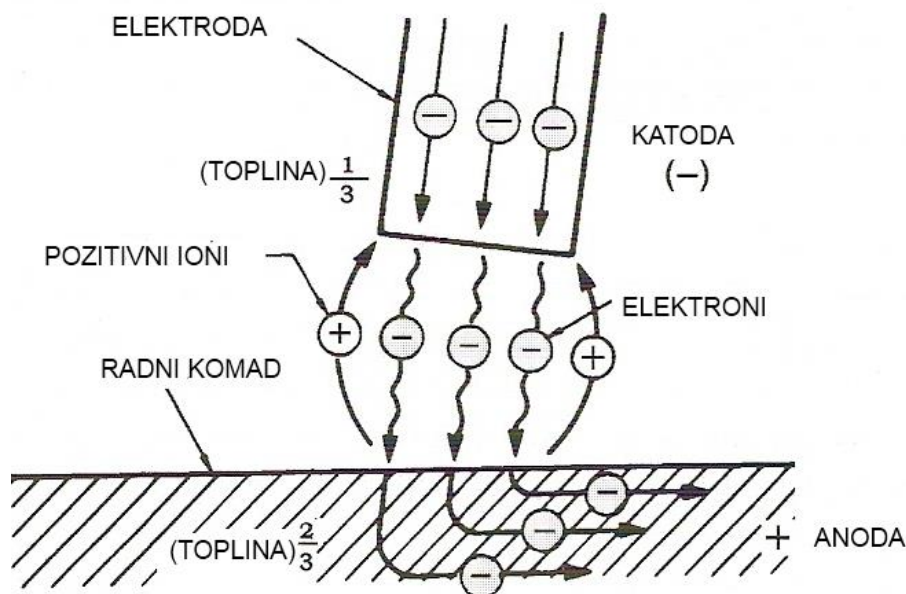
### 5.0.1. Polaritet elektrode i električni luk

Električni luk možemo opisati kao izbijanje naboja u ioniziranoj smjesi plinova i para različitih materijala koji potječu od metala i obloge elektrode te zaštitnih plinova ili praškova.

Električni luk je podijeljen na 3 područja generiranja topline, a to su katoda, anoda i plazma. Da bi struja tekla s vrha elektrode na radni komad potrebna je visoka koncentracija elektrona, zbog toga električni luk za zavarivanje karakterizira visoka jakost struje i nizak napon. Elektroni su emitirani sa katode te se gibaju zajedno sa negativnim ionima u plazmi prema anodi, dok se pozitivni ioni gibaju u suprotnom smjeru. Pozitivni ioni se gibaju u suprotnom smjeru. Na slici 12 prikazan je slučaj dok je elektroda spojena na negativan, a radni komad na pozitivan pol izvora struje. Navedeno se naziva negativan polaritet i gotovo uvijek se koristi kod ručnog elektrolučnog zavarivanja pod vodom.

Duljina električnog luka neposredno je povezana s naponom, a definirana je kao udaljenost između vrha elektrode i površine radnog komada. Povećanjem duljine električnog luka raste i napon potreban da bi se električni luk održao između radnog komada i elektrode. Male oscilacije u vrijednosti napona tijekom zavarivanja su uobičajene i ne utječu na kvalitetu zavora.

Temperaturno područje električnog luka kreće oko 5000 °C te je poprilično konstantno, od čega se približno 2/3 topline generira na anodi (+ pol), a 1/3 topline na katodi (- pol). Podjela topline može se promijeniti, a tu pojavu zovemo termički polaritet. Dakle, polaritet je smjer struje kao pozitivan ili negativan. Na slici 12 je prikazano da se najviše topline stvara na anodi, dok je elektroda spojena na katodu. Drugim riječima ako zavarivač spoji svoju elektrodu na negativni pol na stroju za zavarivanje i povratni vod na pozitivan pol, njegov polaritet će biti negativan. Zavarivač tada zna da će najveća toplina biti na radnom komadu, a ne na elektrodi. Tako zavarivač odlučuje gdje želi da mu se više topline stvara. Korištenjem negativnog polariteta većina topline generirat će se na radnom komadu, taljenje elektrode biti će postepeno i jednoliko. Korištenjem pozitivnog polariteta većina topline generirat će se na elektrodi što će izazvati njezino ubrzano taljenje i time brzu popunu zavora.



**Slika 12. Utjecaj omjera topline polariteta – negativan polaritet**

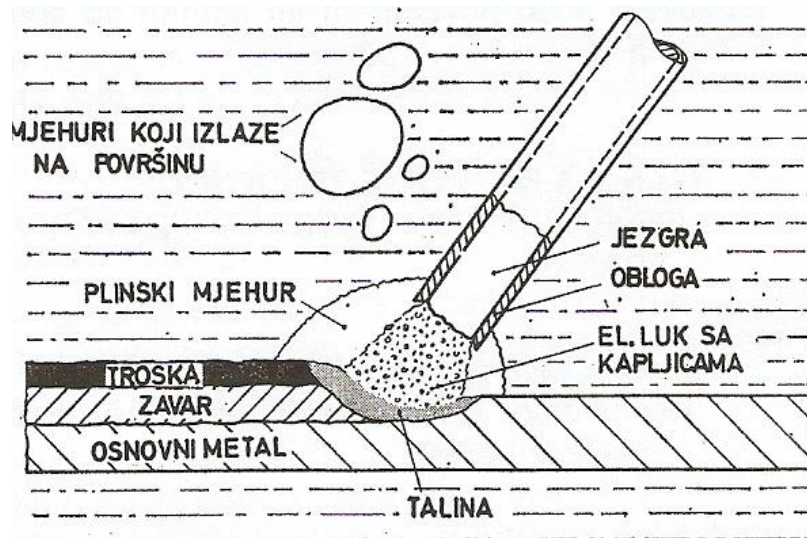
### 5.0.2. Plinski mjehur

Kod mokrog podvodnog zavarivanja obloženom elektrodom energija luka je tako intenzivna da sva voda oko električnog luka trenutno ispari pa se stvara relativno stabilan plinski mjehur oko vrha elektrode koji se održava sve do prekidanja električnog luka.

Mjehurić ima višestruku ulogu i utjecaj na proces zavarivanja:

- Osigurava zaštitu pri prijenosu rastaljenog metala i štiti talinu na osnovnom materijalu
- Smanjuje brzinu hlađenja metala zvara i zone utjecaja topline
- Kod postupaka s plinskom zaštitom, zaštitni plin korodira s mjehurićem pa se smanjuje efekt zaštite i utjecaja zaštitnog plina
- Plinovi u mjehuriću utječu na formiranje poroziteta
- Zbog visoke temperature električnog luka, stvaraju se uvjeti za pojavu atomarnog vodika koji lako difundira u metal zvara i ZUT (zonu utjecaja topline)

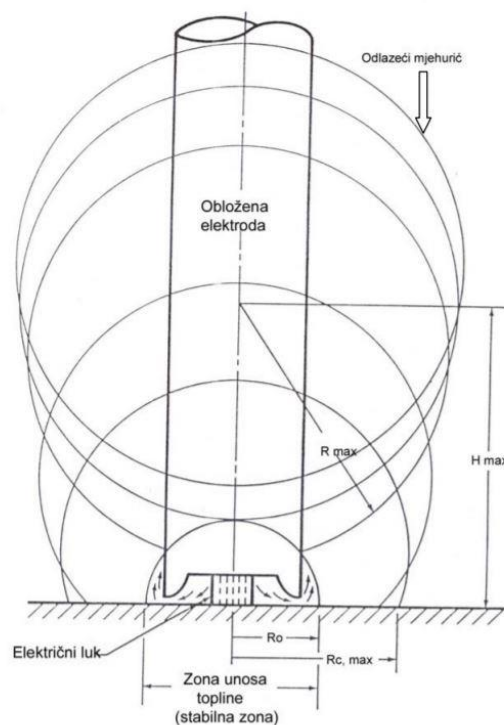
Volumen plinskog mjehura raste sve dok njegov polumjer ne postane tangenta inicijalne praznine, zatim se odvaja i ide prema površini, a na njegovom mjestu odmah nastaje novi plinski mjehur. Ovaj se proces ponavlja sve do prekida električnog luka.



**Slika 13. Proces mokrog podvodnog zavarivanja**

Pomoću ovog mehanizma električni luk konstantno je zaštićen.

Rast i kretanje mjehura prikazani su na slici 14. Visina  $H_{max}$  [mm] na kojoj dolazi do odvajanja mjehurića jednaka je zbroju maksimalnog promjera mjehurića  $R_{max}$  [mm] i promjeru inicijalne praznine  $R_0$ .  $R_{c,max}$  [mm] predstavlja maksimalni promjer zaštitnog mjehura na površini ploče.



**Slika 14. Rast i odvajanje plinskog mjehura pri mokrom podvodnom zavarivanju [21]**

## 5.1. Oprema kod mokrog podvodnog REL zavarivanja

Oprema kod podvodnog REL zavarivanja je slična kao i kod suhog uz uvjet dobre izoliranosti opreme zbog utjecaja okoliša i opasnosti od strujnog udara. Sastoji se od: istosmjernog izvora struje sa sniženim naponom praznog hoda, posebnih kabela s povećanom izolacijom, držača elektrode i elektroda (dodatnog materijala) za mokro podvodno zavarivanje, te sigurnosnog prekidača.

Izvan vode nalazi se pomoćni tim koji se brine za reguliranje parametara zavarivanja, opskrbu ronioca zrakom, sigurnosti, dobavu dodatnog materijala i slično, dok je zavarivač/ronilac pod vodom. U slučaju prekida komunikacije i slično između pomoćnog tima i zavarivača, ronilac mora izaći iz vode zbog sigurnosti.

**5.1.1 Izvor struje zavarivanja** – za mokro podvodno zavarivanje zbog sigurnosti i održavanja električnog luka pod vodom koristi se isključivo istosmjerna struja.

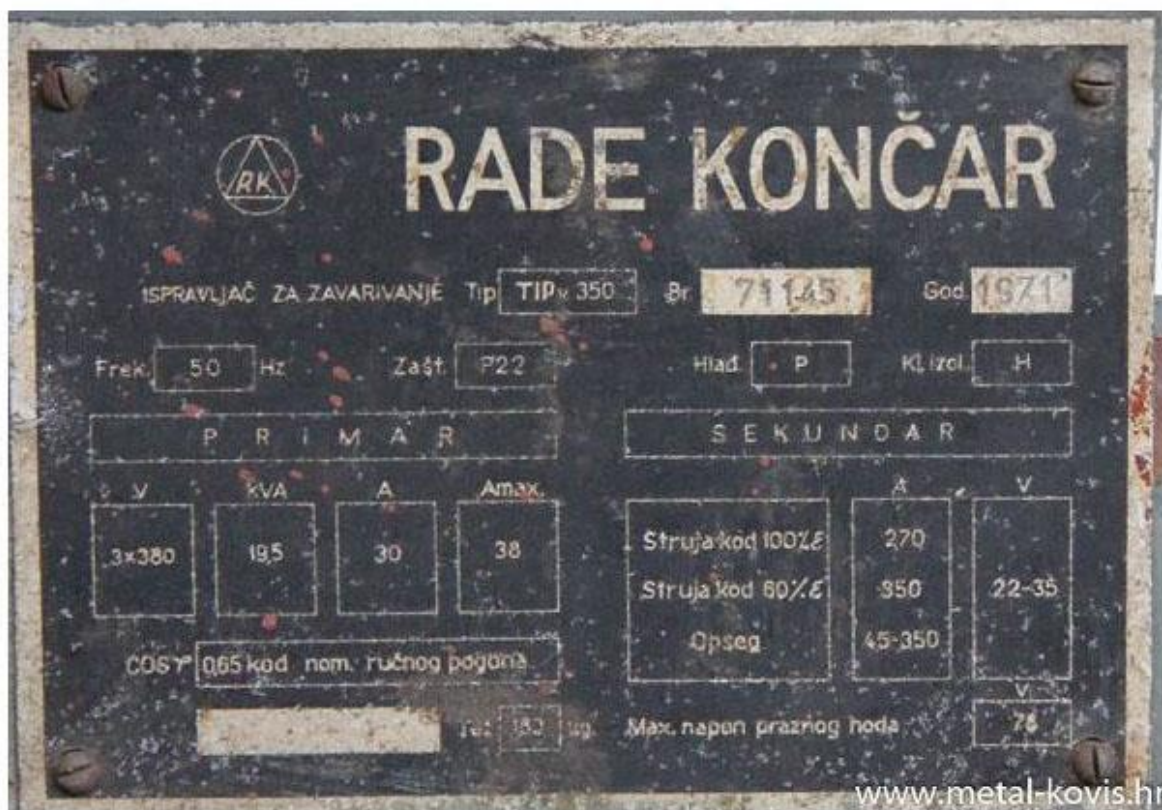
Uređaj za REL zavarivanje može biti izrađen koristeći klasične transformatore, a karakterizira ih jednostavnost, dugotrajnost, te relativno niska cijena izrade. Na samome izvoru struje može se mijenjati jedino parametar jačine struje zavarivanja u amperima [A]. Statička karakteristika takvih uređaja je strmopadajuća.

Bitan faktor za radnu osobinu uređaja za zavarivanje je intermitencija ( $e$ ) u postocima [%]. Intermitencija nam govori koliko vremena naš uređaj za izvor struje može raditi pod određenim opterećenjem bez pojave pregrijavanja. Npr. izvor struje ima intermitenciju  $e = 30 \%$  kod jakosti struje 200 A. To znači da je moguće normalno vrijeme rada kod te struje  $tr = e \times 10 \text{ min.} = 0,3 \times 10 = 3 \text{ min.}$ , a potrebno vrijeme hlađenja  $th = 10 - 3 = 7 \text{ min.}$

Vrijeme ciklusa ( $tc$ ) = vrijeme rada ( $tr$ ) + vrijeme hlađenja ( $th$ ) = 10 min

Podaci vezani uz intermitenciju stroja nalaze se na svakom izvoru struje za zavarivanje, vidljivo na slici 15. [6]





Slika 15. Podaci REL uređaja/izvora struje [15]

**5.1.2. Zavarivački kabel (provodnik)** - Za podvodno zavarivanje koriste se specijalni fleksibilni zavarivački kablovi (slika 16) s pojačanom izolacijom.



Slika 16. Fleksibilan zavarivački kabel proizveden po BS 638/4 normi [16]

**1-vodič:** Cu finožično uže

**2-separator:** poliester folija

**3,4-plašt:** gumena mješavina na temelju nitrilbutadiena (NBL)

Provodnici struje su izuzetno važni za efikasnost i uspješnost zavarivanja. Moraju biti prigodno dimenzionirani da bi osigurali potrebnu struju.

Veličina kabela mora biti prilagođena njegovoj duljini, te sam provodnik mora bit dizajniran tako da učinkovito obavlja provođenje struje dok istovremeno pruža fleksibilnost i otpornost na trošenje.

Najčešće korištena debljina (površinski presjek) kabela iznosi 50 mm<sup>2</sup> jer kada se zavaruje na većim udaljenostima (dubinama) između izvora struje do mjesta zavarivanja pad napona je manji zbog električnog otpora. Uzima se u obzir da se za mokro podvodno zavarivanje treba koristiti 10-20% veće vrijednosti struje, većinom zbog gubitka topline i električnog otpora. Baš zbog pada napona potrebno je koristiti što kraće kablove ukoliko je to moguće. Zbog sigurnosti svi spojevi moraju biti dobro izolirani. Na držač elektrode moguće je spojiti i kabel manje debljine (površinskog presjeka 35 mm<sup>2</sup>) iz razloga da bi zavarivač lakše kontrolirao elektrodu.

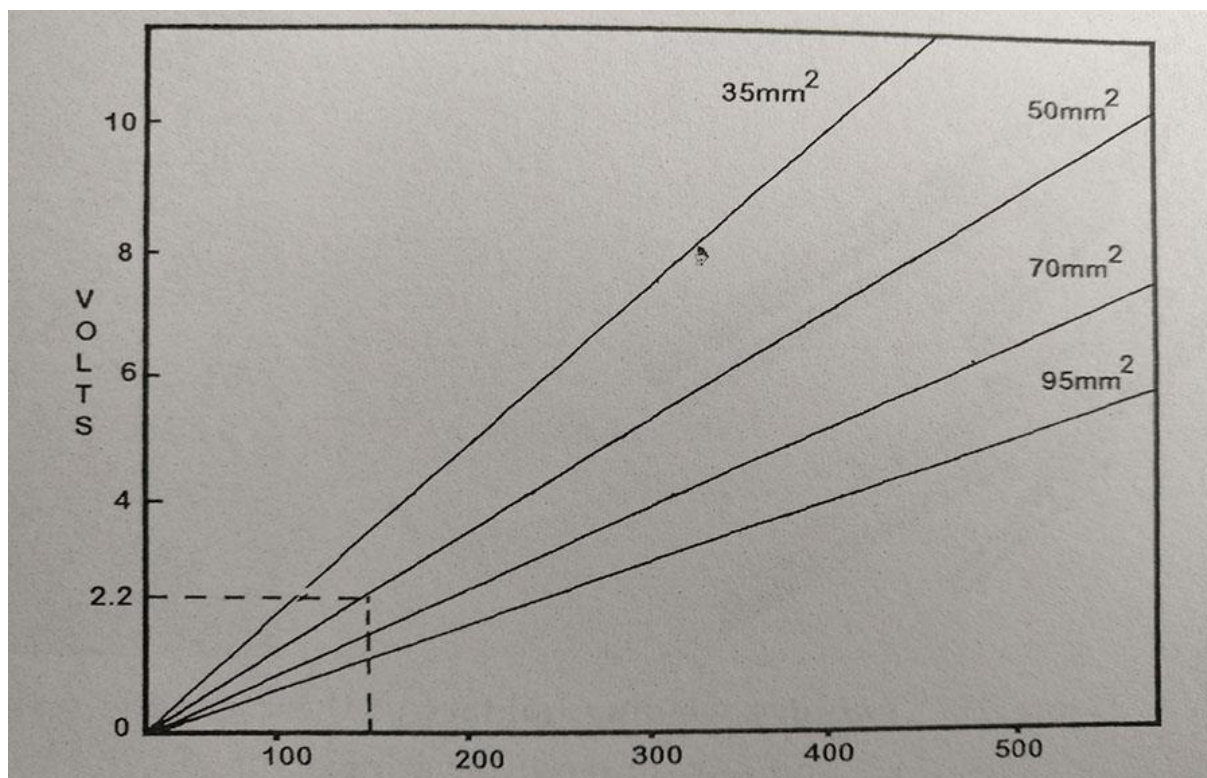
Pad napona bilo kojeg provodnika možemo računati zadanom formulom:

$$V = \frac{K \times M \times I}{CSA}$$

Gdje je:  $V$ =napon [V],  $K$ =konstanta (0.017),  $M$ =duljina kabela [m],  $I$ =struja [A],  $CSA$ =poprečni presjek kabela [mm<sup>2</sup>]

Na slici 17 prikazan je pad napona na duljinama kabela od preko 50 m, za različite veličine površinskog presjeka provodnika.

Povratni vod mora biti pričvršćen što je bliže moguće točki zavarivanja zbog sigurnosti i prevenciji magnetskih smetnji. [13]



Slika 17. Pad napona na kabelima duljima od 50 m [13]

**5.1.3. Sigurnosni prekidač** – zbog sigurnosti pri mokrom podvodnom zavarivanju moramo imati sigurnosni prekidač koji se nalazi izvan vode nadohvat ruke pomoćnome timu. Osoba koja upravlja prekidačem mora poštivati naredbe zavarivača tako da mu zatvara ili otvara strujni krug kada je zavarivaču to potrebno. Strujni krug mora biti isključen cijelo vrijeme, dok zavarivač nije spreman na zavarivanje. Sigurnosni prekidači mogu biti jednopolni i dvopolni.



Slika 18. Sigurnosni prekidač [17]



**5.1.3. Držać elektrode** – moraju biti posebno izolirani neprovodljivim materijalima i napravljeni za podvodno zavarivanje. Treba se koristiti mehanizam bez opruga radi lakog i jednostavnijeg umetanja i zamjene elektroda u vodi. U podvodnoj upotrebi trajnost pri povećanim dubinama i izolacija su najbitnije značajke, uz jednostavnost zamjene elektroda. [13]



**Slika 19. Držać elektrode za podvodno zavarivanje [18]**

**5.1.4. Dodatni materijal** - U postupku podvodnog ručnog elektrolučnog zavarivanja primjenjuju se obložene elektrode. Obložene elektrode sastoje se od metalne jezgre (šipka, žica), obloge i vodonepropusnog premaza.

Odabir odgovarajuće elektrode za podvodno zavarivanje provodi se prema slijedećim kriterijima:

- a) struktura osnovnog materijala
- b) potrebna mehanička svojstva zavara
- c) metalurški zahtjevi
- d) mogućnost nastanka pukotina
- e) dubina na kojoj se zavarivanje odvija
- f) vrsta zavara
- g) pozicija zavarivanja

Obložena elektroda sastoji se od metalne jezgre na koju je koncentrično nanescena nemetalna obloga, čiji sastav određuje vrstu elektrode. Metalna jezgra elektrode mora biti od istog ili sličnog materijala kao i radni komad, a obloga se određuje prema osnovnom metalu, zahtjevima kvalitete zavarenog spoja i uvjetima pri zavarivanju.

Metalna jezgra ima ulogu vodiča za struju te glavnog metala za popunu spoja.

Obloga kod elektroda za podvodno zavarivanje i njihovi premazi, u cilju sprečavanja prodora vode u oblogu, igraju ključnu ulogu za stabilno održavanje električnog luka u vodi.

Električni luk se kod mokrog podvodnog zavarivanja obloženom elektrodom stalno podržava u parno-plinskoj atmosferi koja nastaje isparavanjem vode, te razlaganjem i izgaranjem obloge elektrode. Bitna karakteristika obloge je da gori sporije od metalne jezgre kako bi električni luk bio cijelo vrijeme zaštićen plinskim mjehurićem. Isto tako preporuča se da duljina električnog luka ne bude duža od pola promjera elektrode kako bi se lakše održavao plinski mjehur.

Funkcija obloge [13]:

1. Da taljenjem pruži zaštitni sloj plina oko električnog luka i rastaljenog metala, sprečavajući utjecaj atmosfere
2. Održanje stabilnosti električnog luka i lakše kontrole istog
3. Osigurava nastanak troske koja štiti zavar od utjecaja atmosfere te smanjuje brzinu hlađenja.
4. Olakšanje zavarivanja u različitim položajima
5. Povećanje učinkovitosti elektrode
6. Da zadovolji mehaničke zahtjeve i legirne elemente zavara
7. Pružanje dobrog izgleda i izvedbe zavara

Prema oblogama elektrode za podvodno zavarivanje dijelimo na [19,13]:

- a) rutilne
- b) kisele
- c) celulozne
- d) bazične

Rutilne elektrode pokazuju najbolja operativna svojstva za primjenu pri mokrom

podvodnom zavarivanju te su najčešće u uporabi za mokro podvodno zavarivanje. Jedan od glavnih razloga tome jest dobra stabilnost električnog luka pri zavarivanju ovim elektrodama. Ove elektrode su posebno pogodne za zavarivanje u vertikalnoj poziciji i iznad glave zavarivača.

Zavareni spojevi dobiveni korištenjem rutilnih elektroda posjeduju dobra mehanička svojstva, lijep izgled te mogućnost jednostavnog otklanjanja troske nakon završetka zavarivanja. Nedostatak je da zavareni spojevi dobiveni rutilnim elektrodama posjeduju slabiju žilavost u metalu zavara.

Elektrode s kiselom oblogom imaju ograničena operativna svojstva i relativno nestabilan luk stoga se rijetko koriste kod mokrog podvodnog zavarivanja.

Celulozne elektrode su karakterizirane električnog luka s velikom penetracijom. Pogodne su za zavarivanje u svim pozicijama. Nedostaci su visoka razina vodika, gruba površina zavara.

Bazične elektrode daju zavareni spoj dobrih mehaničkih svojstava, a zbog manje prisutnosti štetnih plinova i nemetalnih uključaka u metalu zavara smanjena je i sklonost nastanku pukotina i poroznosti. Najčešće se primjenjuju kod zavarivanja konstrukcija sa visokim zahtjevima za mehanička svojstva i kvalitetu.

Metalna jezgra elektrode može biti od [13]:

- a) niskougličnog mekog čelika (C/Mn)
- b) niskolegiranog čelika
- c) austenitnog nehrđajućeg čelika
- d) na bazi nikla

Za primjenu u podvodnom zavarivanju većinom se koriste C/Mn i elektrode nehrđajućeg/nikl čelika („duplex“ tip).

Za čelike s većim udjelom ugljika ili legiranih elemenata koriste se elektrode od austenitnog nehrđajućeg čelika ili elektrode na bazi nikla.

Elektrode na bazi nikla imaju kvalitetniji zavar zbog malih zaostalih naprezanja koja nastaju malom razlikom u toplinskom širenju ferita, na strani osnovnog materijala, te nikla, na strani dodatnog materijala, dok kod elektroda od austenitnog nehrđajućeg čelika to nije slučaj - zbog različitog volumenskog povećanja uslijed zagrijavanja dolazi do povećanih zaostalih naprezanja pa su stoga takvi spojevi često podvrgavaju žarenju za redukciju zaostalih naprezanja.

Uloga vodonepropusnog zaštitnog premaza na elektrodi je da spriječi prodor vlage do obloge elektrode. Jer bi u protivnom vlaga razorila oblogu. Vlažna obloga također postaje električki provodljiva. Zatvara se strujni krug između jezgre i okolne vode, te se narušava stabilnost procesa. Isto tako vodik koji se burno izdvaja na površini jezgre također razlaže oblogu i čini elektrodu potpuno neupotrebljivom. Prije samog korištenja elektrode potrebno je ostrugati vodonepropusni premaz kako bi mogli ostvariti električni luk između elektrode i radnog komada. [19]



**Slika 20. Navy 1 i Navy 2 elektrode [20]**

Na slici 20 prikazane su elektrode razvijene na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Elektrode su s dvostrukom oblogom koje omogućavaju laganu uspostavu i vođenje električnog luka. Na njima nije potrebno mehanički skidati zaštitni sloj da bi uspostavili električni luk.



**Slika 21. Elektrode Navy 1 i Navy 2 nakon završetka zavarivanja [20]**

Proizvođači elektroda za mokro podvodno zavarivanje razvili su vlastite elektrode po pitanju sastava obloge, metala za popunu zvara i vodonepropusnog sloja.

#### **5.1.5. Oprema zavarivača/ronioca** – osnovna oprema ronioca sastoji se od [13]:

1. Zavarivačka/zaštitna maska – ronilac mora biti opremljen s maskom koja ima zavarivačku leću koja je prilagođena uvjetima vode u kojoj se zavaruje.
2. Gumene rukavice – uobičajeno se nose tanke rukavice ispod debelih jer to smanjuje rizik opekotina od taljevina, pogotovo kod zavarivanja u određenim pozicijama.
3. Ronilačko odijelo – odabir odijela ovisi o uvjetima (npr. temperaturi vode) u kojima će ronilac/zavarivač raditi.

4. Sistem dobave zraka – boca sa stlačenim zrakom, crijevo za dobavu zraka izvan vode i spremnik zraka na površini
5. Uređaj za komunikaciju – u svrhu komunikacije sa pomoćnim timom izvan vode koji nadzire zavarivača/ronioca.
6. Ampermetar/voltmetar – preporuka za korištenje ampermetra i voltmetra se daje iz razloga da zavarivač i njegov pomoćnik budu potpuno svjesni struje zavarivanja i napona u svim trenucima. To pomaže pri održanju pravilnog električnog luka zavarivanja.
7. Set za demagnetizaciju – uključuje uređaj za očitavanje utjecaja magnetskih smetnji te uređaj za uklanjanje magnetskih smetnji.
8. Ostali pomoćni uređaji i alati - ronilac treba biti opremljen svim potrebnim alatima koji mogu biti pneumatski / hidraulički upravljani, ili ručno kao što su zavarivački čekić, žičana četka, pila, brusilica, itd.



**Slika 22. Zavarivači u ronilačkim odijelima s opremom**

## 5.2. Osnovne tehnike rada

Kod podvodnog mokrog zavarivanja imamo 3 osnovne tehnike rada [13]:

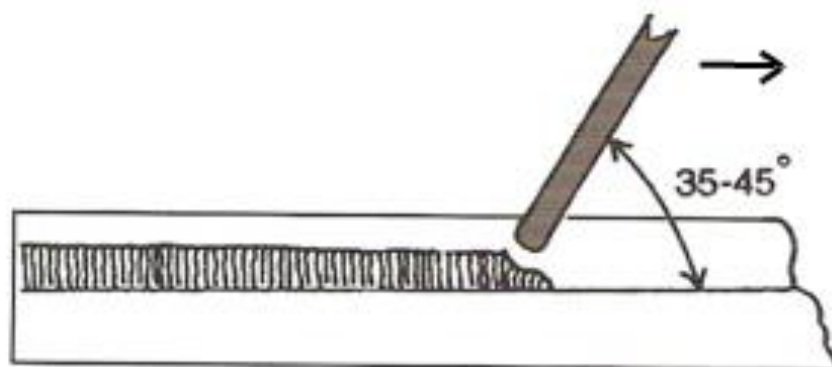
1. Tehnika povlačenja
2. Tehnika njihanja
3. Tehnika korak-unatrag

Sve navedene tehnike su tehnike dodirom. To je osnovni princip rada podvodnog mokrog zavarivanja. Postoje naprednije tehnike rada, no gore navedene su osnovne i jedine koje se zahtijevaju.

### 5.2.1. Tehnika povlačenja (*Drag technique*)

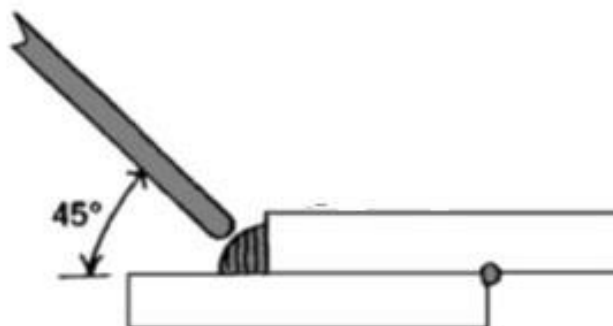
Kod tehnike povlačenja zavarivač jednostavno povlači elektrodu po radnom komadu pri čemu održava lagani pritisak dok se elektroda tali.

Ako se uzme u obzir da zavarivač održava pravilan kut nagiba elektrode u odnosu na radni komad i jednoliku brzinu povlačenja, elektroda će gotovo sama proizvesti pravilan sloj zavarenog spoja. Brzina povlačenja elektrode po radnom komadu direktno je povezana s kutom nagiba elektrode. Što je kut nagiba elektrode veći, brzina povlačenja elektrode biti će manja, sloj zavaća širi, a penetracija dublja. Kod mokrog podvodnog zavarivanja zahtijevani kut nagiba elektrode je između  $35-45^\circ$  zbog toga što se tim kutom dozvoljava da nastali plinski mjehuri mogu odvajati od električnog luka a da pritom ne ometaju taljenje elektrode.



Slika 23. Tehnika povlačenja [13]

Tehniku povlačenja najčešće koriste zavarivači početnici. Ova tehnika najpogodnija je za kutne i sučeljene zavare. Na slici 24 prikazan je potreban kut nagiba pri kutnom zavaru. [13]



**Slika 24. Kut nagiba elektrode kod kutnog zavora [13]**

### **5.2.2. Tehnika njihanja (*Oscillation technique*)**

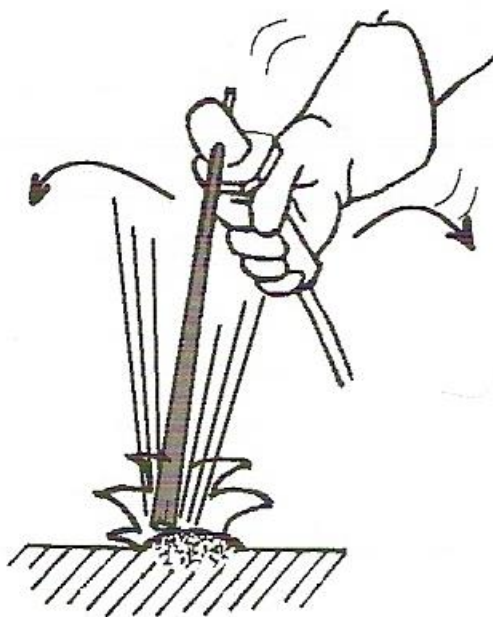
Kod tehnike njihanja prikazanoj na slici 25, zavarivač njiše elektrodu tako da u najbližoj točki spoja elektrode i držača elektrode mijenja kut nagiba, dizanjem i spuštanjem u vertikali tijekom zavarivanja. Dakle kut nagiba se konstantno mijenja tijekom procesa zavarivanja ovom tehnikom.

Tako postižemo veći depozit metala i sprečavanje nekoncentrično izgaranje elektrode, posebno pri zavarivanju korijena spoja.

Koncentrično izgaranje može se opisati kao jednoliko taljenje elektrode cijelog opsega. Zbog nešto manjih kutova nagiba nego kod suhog REL zavarivanja, elektroda ima manju kontaktnu površinu pri dodiru s osnovnim materijalom što prije ili kasnije dovede do bržeg taljenja elektrode na mjestu elektrode bližem osnovnog materijala. Rezultat je nejednako izgaranje elektrode te pomak električnog luka prema točki najbližoj radnom komadu. Kako bi se to spriječilo kut nagiba elektrode se mijenja tehnikom njihanja.

Ova tehnika se najčešće koristi pri zavarivanju korijena zavora kod kutnih spojeva jer se tada elektroda može nepredvidivo ponašati. [13]



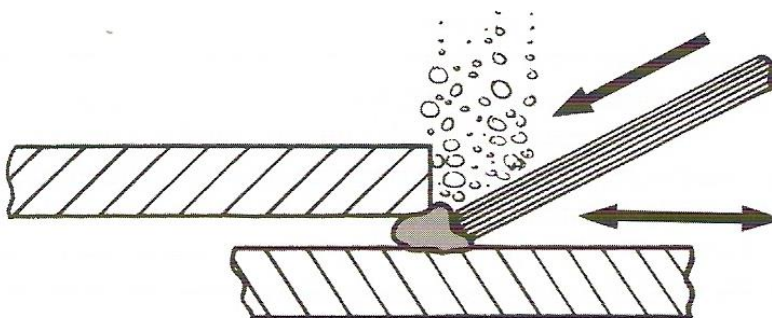


**Slika 25. Tehnika njihanja [13]**

### **5.2.3. Tehnika korak-unatrag (Step-back technique)**

Kod ove tehnike zavarivač odugovlači pomicanje elektrode dalje dužinom žlijeba na trenutak tako da ju pomiče natrag u talinu zavora za nekoliko milimetara. Tako dobijemo veću čvrstoću i širinu zavora, uz poboljšanje brzine hlađenja taline i mehaničkih svojstava spoja. Ova tehnika zahtjeva nešto više iskustva i vještina zavarivača.

Kod zavarivanja kutnih spojeva u tri prolaza, ova tehnika je najbolji izbor za zadnji prolaz, jer se s njom uklanjaju sve manje greške nastale pri drugom prolazu tijekom netočnog pozicioniranja sloja zavora. Kutni spojevi su najčešće korišteni pri mokrom podvodnom zavarivanju. [13]

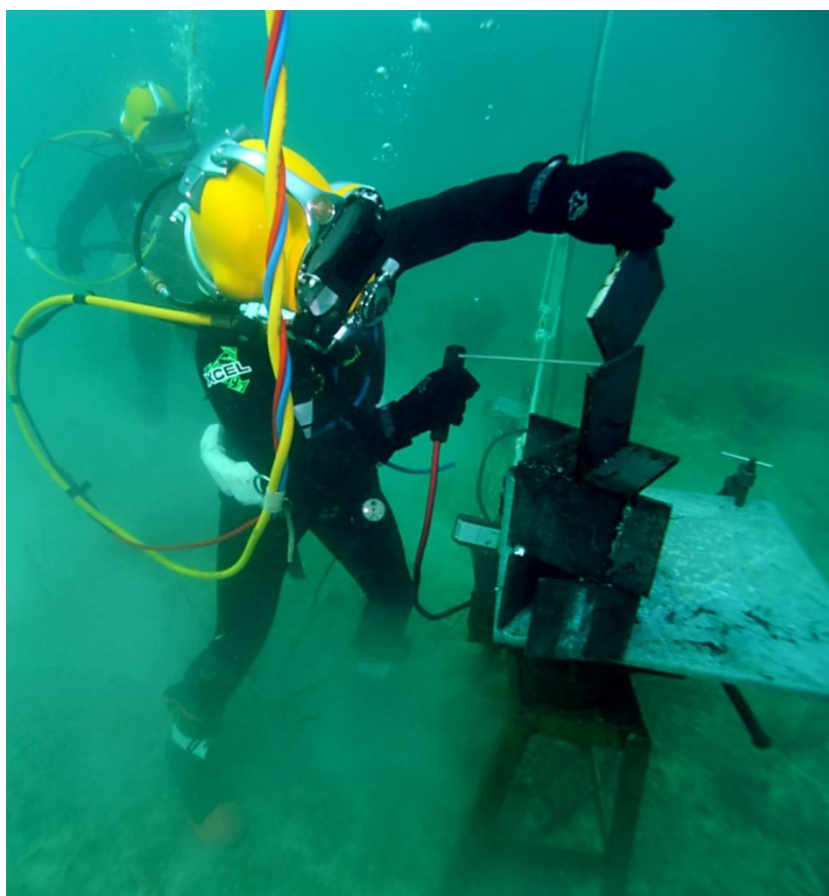


**Slika 26. Tehnika korak-unatrag [13]**

### 5.3. Obuka zavarivača/ronilaca

Podvodno zavarivanje je proces koji zahtijeva odličnu utreniranost i kondiciju stručnjaka koji je zadužen za njegovo izvršenje, a ključnu ulogu u njegovoj uspješnosti igra dobra pripremljenost kompletnog tima i sam proces organizacije. Također je i vrlo važna kvaliteta opreme koja se tom prilikom koristi.

Kako se zavarivanje izvodi u posebnim okolišnim uvjetima, koji su uz to i vrlo opasni za ronioce, obavezno je da oni budu izuzetno dobro obučeni, što će postići pohađanjem škole za podvodno zavarivanje. Potražnja na svjetskom tržištu za ovakve zavarivače je velika, toliko velika da u ponudi nema dovoljno obučениh podvodnih zavarivača.



**Slika 27. Obuka podvodnog zavarivača [14]**

U principu, ukoliko mokro podvodno zavarivanje izvodi osoba koja posjeduje dovoljno znanja i iskustva u ovom poslu i u ronjenju, nema apsolutno nikakvog razloga da se ovakav način obrade ne izjednači sa obradom u suhoj atmosferi, sa stajališta kvalitete procesa.

Obuke se provode u ovlaštenim učilištima i to u 2 dijela, nastavni plan i program podrazumijeva teorijski i praktičan dio. Nakon savladanog teorijskog dijela, polaznik pristupa praktičnom dijelu. Prolaskom dijela ronjenja obuka se nastavlja u zavarivačkom smjeru. Tehnike zavarivanja uključuju poznavanje uređaja, principa rada i pripreme zavara. Vježbe podvodnog zavarivanja provode se prvotno u kontroliranim uvjetima bazena, a zatim, u realnim uvjetima.



**Slika 28. Obuka zavarivača u kontroliranim uvjetima bazena [24]**

Završetkom obuke, polaznik pristupi komisijskom ispitu gdje u realnim uvjetima mora zadovoljiti vještinu ronjenja te zavarivanja. Sami zavar podvrgne se ispitivanju nekom od nerazornih metoda te se utvrdi da li zadovoljava parametre. Ako je sve u redu, polaznik dobiva certifikat podvodnog zavarivača. [23]

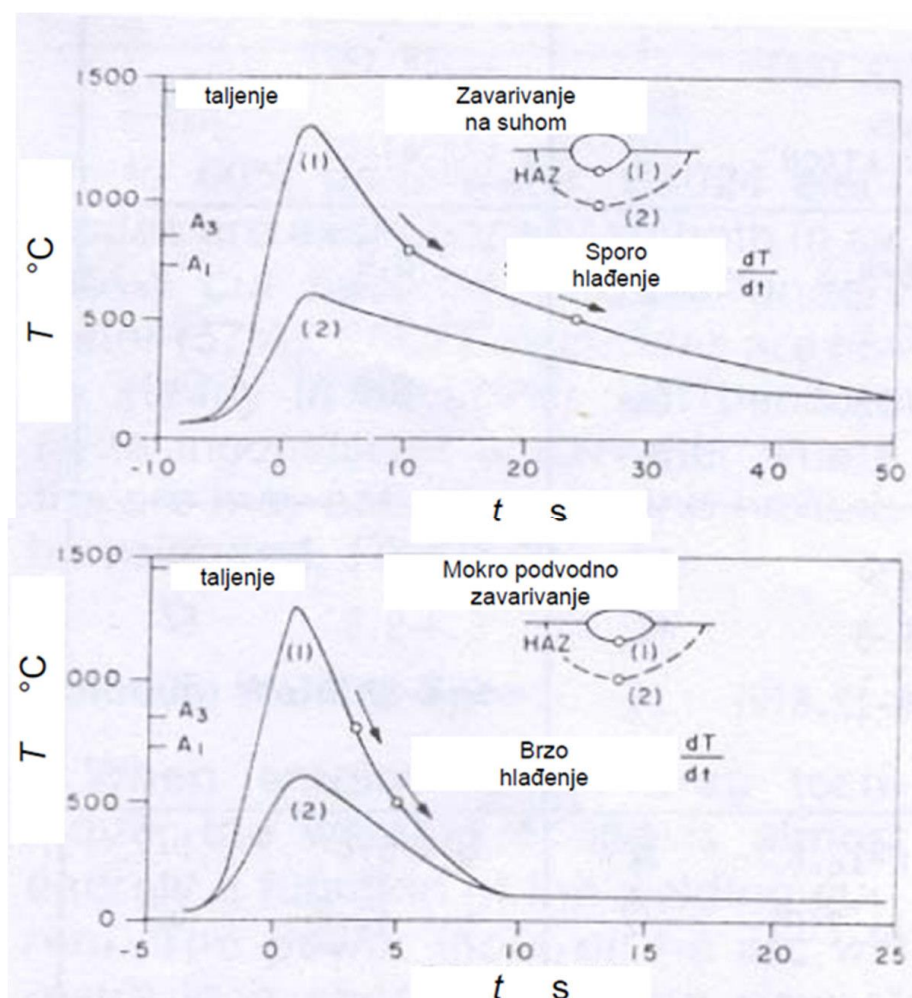
## 6. Problemi kod mokrog podvodnog zavarivanja

Kao dva najznačajnija problema kod mokrog podvodnog zavarivanja možemo navesti visoke koncentracije vodika u materijalu zavora i ubrzano hlađenje zavora, koji predstavljaju najveću prepreku kod ostvarivanja podvodnog zavarenog spoja mehaničkih svojstava ekvivalentnih spoju izvedenom u normalnim uvjetima, na zraku.

### 6.1. Ubrzano hlađenje zavora

Hlađenje u vodenom okruženju znatno je intenzivnije od hlađenja u normalnim uvjetima. Iako plinski mjehur donekle izolira proces zavarivanja, brzina odvođenja topline s radnog komada u vodu je intenzivna. Slika 29 prikazuje usporedbu intenziteta hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima na suhom i pri mokrom podvodnom zavarivanju. [21]

### 6.2. Poroznost i krhkost zbog vodika



**Slika 29. Usporedba brzina hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima i mokrom podvodnom zavarivanju [21]**

Direktan pristup vode mjestu zavarivanja ima nekoliko negativnih posljedica na svojstva zavarenog spoja. Zbog brzog hlađenja, dolazi do stvaranja lokalno zakaljene strukture visoke tvrdoće u zavarenom spoju.

Uz to, visok udio difundiranog vodika čini takvu strukturu osjetljivom na pojavu vodikove krhkosti, tj. dovodi do pojave pukotina uzrokovanih vodikom. Takvoj situaciji pridonosi i niz mikropora, koje nastaju zbog brze solidifikacije i nemogućnosti otplinjavanja metala zavara. Prema nekim istraživanjima, sadržaj vodika u materijalu raste i zbog primjene katodne zaštite pri čemu na površini metala nastaje atomarni vodik koji brzo difundira u rešetku materijala.

Povišeni udio vodika u zavaru posljedica je povišenog parcijalnog tlaka vodika u električnom luku. Glavni izvor vodika je vodena para, koja na visokim temperaturama disocira na vodik i kisik. Vodik u zavar može doprijeti i iz obloge elektrode, posebno ako je obloga kontaminirana vlagom pri proizvodnji ili tijekom rukovanja. Potrebno je spomenuti da je udio vodika u metalu zavara pri mokrom podvodnom zavarivanju veći i zbog povišenog hidrostatskog tlaka, koji je uvijek viši nego je to slučaj kod zavarivanja na zraku.

Unos topline, osim na mikrostrukturu i mehanička svojstva zavara, utječe i na količinu difundiranog vodika. Iako se velikim povećanjem unosa topline, a zbog visokog intenziteta hlađenja, ne utječe znatno na produženje vremena hlađenja, zabilježen je utjecaj unosa topline na količinu difundiranog vodika.

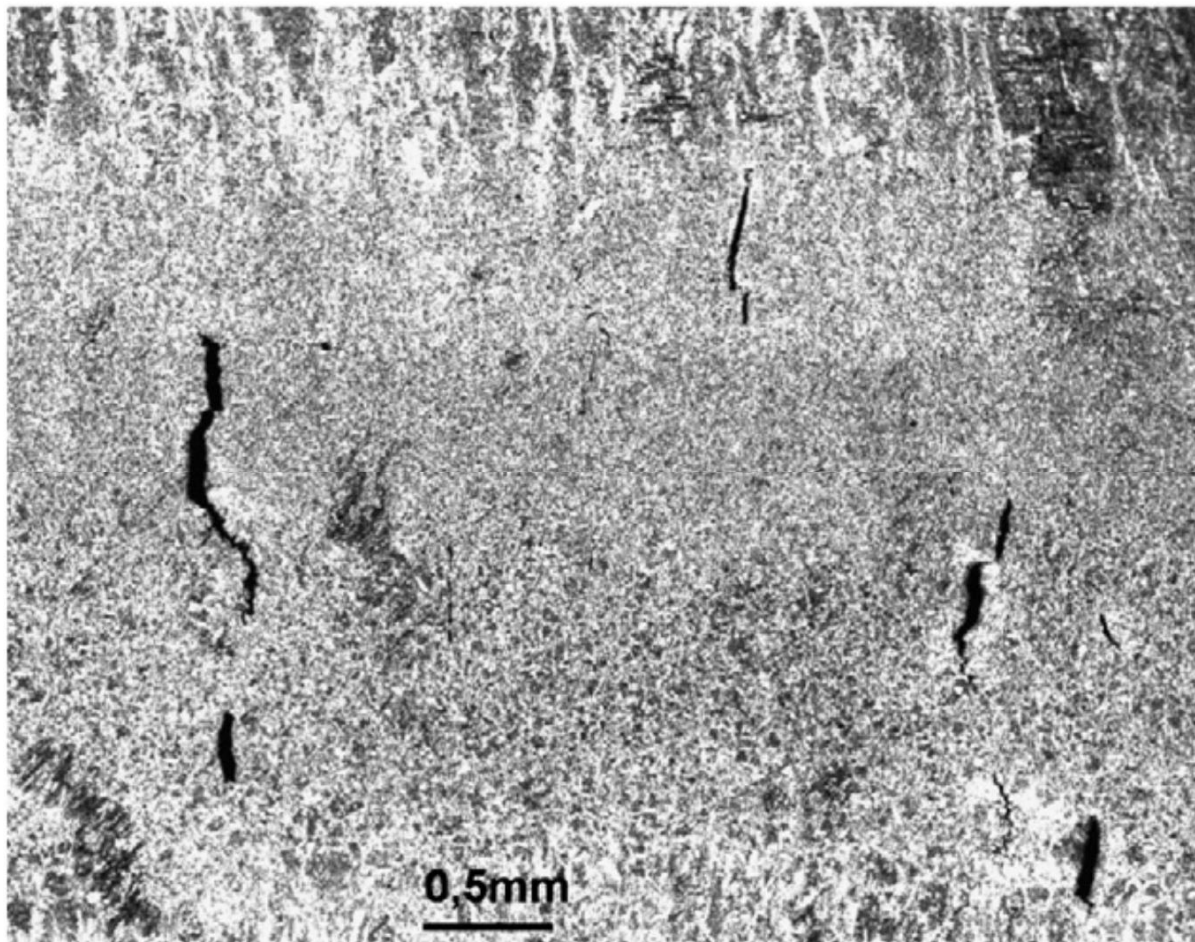
Na apsorpciju vodika, osim sastava obloge i parametara zavarivanja, znatno utječe i polaritet elektrode. Dokazano je da se manje vodika apsorbira ako je elektroda na negativnom polu.

Vodik koji je difundirao u talinu zavara kod visokih temperatura nalazi se u atomarnom stanju. Pri hlađenju vodik najčešće prelazi u molekularno stanje i ostaje u materijalu na mjestima sitnih pogrešaka, pri čemu nastaju vrlo visoki tlakovi. Njegova raspodjela ovisi od količine i tipu raznih uključaka, mikro i makro pora te njihovog rasporeda, koje se pod utjecajem visokog tlaka vodika između sebe povezuju u pukotinu.

Pukotine inducirane vodikom karakterizira krhki lom inače duktilnih materijala pri kontinuiranom opterećenju i uz prisutnost vodika, i to pri naprezanju nižem od granice tečenja. Mehanizam pukotine se općenito opisuje kao podkritična propagacija pukotine koja često



uzrokuje zakašnjele prijelome, te ovisi o koncentraciji vodika, čvrstoći materijala, mikrostrukтури, naprezanjima i temperaturi.



**Slika 30. Hladne pukotine uzrokovane vodikom kod mokrog podvodnog zavarivanja [25]**

Vodikova krhkost tj. pojava pukotina induciranih vodikom je prvenstveno fenomen povezan s feritnim čelicima i grubozrnatom lokalno zakaljenom strukturom ZUT-a. Te pukotine se najčešće javljaju u ZUT-u, ali se vremenom mogu pojaviti i u metalu zavora. Proces pojave vodikovih pukotina je vremenski zavisn, što znači da se one mogu javiti u različitim vremenskim intervalima nakon zavarivanja. [21]

## 7. Zaključak

Posljednjih godina mokro podvodno zavarivanje se brže razvija iz razloga pojave sve više „off-shore“ postrojbi zbog traženja i iskorištavanja novih nalazišta nafte i plina ispod morske površine. Proces je vrlo bitan i za reparaturne radove na oplatama brodova.

Takvi poslovi zahtijevaju visoku preciznost, kvalitetu i sigurnost, pa su se stoga konstantnim razvojem opreme i dodatnih materijala poboljšala i svojstva zavara te samog procesa zavarivanja. Daljnjim razvojem tehnologije i opreme očekuje se postizanje još veće primjenjivosti mokrog podvodnog zavarivanja. Glavni cilj razvoja je zadržati istu razinu kvalitete na većim dubinama i podići mehanička svojstva zavara postignutih mokrim podvodnim zavarivanjem.

Prednost mokrog podvodnog zavarivanja nad drugim tehnikama što je mobilna, fleksibilna, jeftina i vrši se uz najkraći period pripreme. Također manji su troškovi izvedbe u odnosu na suho podvodno zavarivanje.

Najveći problem predstavlja nepovoljna vodena atmosfera koja uzrokuje hladne pukotine i poroznost, utječe na oblogu elektrode i stabilnost električnog luka te povećava brzinu hlađenja zavara i time povećava krhkost. Nakon procesa zavarivanja zavar se podvrgava nekoj od nerazornih metoda ispitivanja s ciljem provjere sigurnosti konstrukcije.

Bitan utjecaj kod mokrog podvodnog zavarivanja je ronilac/zavarivač zbog faktora ljudske greške. Iz tog razloga svi zavarivači moraju biti dovoljno kvalificirani za taj posao pa je vrlo bitno da su prošli određenu obuku propisanu normama te su priznati kao kompetentni za podvodno zavarivanje. Dobrom vještinom zavarivanja te odobrenom licencom moguće je postići zahtijevanu kvalitetu zavara.

Kod zavara visokih zahtijeva kvalitete ipak se odabire suho podvodno zavarivanje iz razloga sigurnosti konstrukcije. Suho podvodno zavarivanje eliminira utjecaje nepovoljne vodene atmosfere te tako daje bolju kvalitetu zavara.

## 8. Literatura

- [1] <http://proizvodno-strojarstvo.blogspot.hr/2011/07/podvodno-zavarivanje.html>
- [2] Kralj S., Kožuh Z., Garašić I., Stanje i trendovi razvoja podvodnog zavarivanja i nerazornih ispitivanja, časopis Zavarivanje, br. 48, god. 2005., str. 153-165
- [3] <https://www.jfdglobal.com/index.php>
- [4] <https://www.diversinstitute.edu/programs/underwater-welding/>
- [5] <http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml>
- [8] <https://hrcak.srce.hr/file/155330>
- [6] [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/pod\\_pos.html](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/pod_pos.html)
- [7] Dr.sc. Ivan Samardžić; Povijest zavarivanja; Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2012.
- [8] <https://hrcak.srce.hr/105594>
- [9] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno\\_elektrolu%C4%8Dno\\_zavarivanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno_elektrolu%C4%8Dno_zavarivanje)
- [10] <https://metal-kovis.hr/>
- [11] <http://tigzavarivanje.com/wp-content/uploads/2013/11/REL-postupak.jpg>
- [12] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1465217921-0-underwaterweldingandcuttinggaraikouh\\_rev2.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465217921-0-underwaterweldingandcuttinggaraikouh_rev2.pdf) - UNDERWATER WELDING AND CUTTING, Doc.dr.sc. Ivica Garašić, Prof.dr.sc. Zoran Kožuh 2014/2015
- [13] David J. Keats; Underwater Wet Welding; A Welder's Mate; TJ International, Padstow, Cornwall, 2011.
- [14] <http://weldingsource.org/taking-the-plunge-a-guide-to-starting-an-underwater-welding-career/>
- [15] <https://metal-kovis.hr/webshop/price/1908/aparat-za-varenje-rade-konar>
- [16] <http://elka.hr/hofr/>
- [17] <http://www.filnor.com/products/type-a-knife-switch.php>
- [18] <https://waterwelders.com/stinger-electrode-machine/>
- [19] D. J. Keates; Professional divers manual on wet-welding, Cambridge, 1990.



[20] S. Kralj, I. Garašić, Z. Kožuh; Podvodno mokro zavarivanje i podvodno ispitivanje u održavanju pomorskih objekata; FSB Zagreb

[21] [http://repozitorij.fsb.hr/256/1/19\\_05\\_2008\\_Doktorski\\_rad\\_Garasic\\_2008.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/256/1/19_05_2008_Doktorski_rad_Garasic_2008.pdf) - Garašić I.; Osjetljivost celika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju; Doktorski rad, Zagreb 2008.

[22] Napredovanje hiperbarickog podvodnog zavarivanja do velikih dubina kao rezultat razvoja off shore tehnologije; casopis Zavarivanje, br. 29, god. 1986; str. 287-295

[23] <https://www.akademijaoxford.com/kurs-i-obuka-za-podvodno-zavarivanje.php>

[24] <http://www.hydroweld.com/2016-Training-Miami.html>

[25] E. Padillaa, N. Chawlaa, L.F. Silvab, V.R. dos Santos, S. Paciornik; Image analysis of cracks in the weld metal of a wet welded steel joint by three dimensional (3D) Xray microtomography, Materials characterization, 2013. str. 139-144